УДК 621.34

РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА КОЛЕБАТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ С МАШИНОЙ ДВОЙНОГО ПИТАНИЯ

А.В. Аристов

Томский политехнический университет
E-mail: avv@ido.tpu.edu.ru

Представлены результаты исследований колебательных комплексов на основе электрических машин углового и линейного движения. Основное внимание уделено машинам двойного питания, работающих непосредственно в режиме вынужденных колебаний. Проведен анализ рабочих частотных, регулировочных и механических характеристик данного класса электроприводов, представлены новые алгоритмы управления, обеспечивающие резонансный режим работы.

В последнее время все большее распространение приобретают безредукторные колебательные электроприводы (КЭП), построенные на базе практически всех типов серийно выпускаемых электрических машин, работающих непосредственно в режиме периодического движения. Это обусловлено рядом таких преимуществ, как: исключение потерь энергии в дополнительных механических звеньях преобразования движения, снижение мощности управления и повышения надежности всей системы в целом. Простота и удобство сопряжения электрических машин с электронными узлами управления, возможность плавно и на ходу регулировать параметры механических колебаний при обеспечении высокой равномерности движения, широкий диапазон воспроизведения колебаний по частоте, амплитуде и форме – все это предопределяет бурное развитие и широкое применение КЭП на их основе [1].

Как правило, для создания колебательного режима работы используются те же принципы управления, что и в следящих системах, а именно, применение различных видов модуляции напряжений (токов) при питании обмоток исполнительных двигателей. Различают три основных вида модуляции: линейно-фазовую, балансно-амплитудную и балансно-частотную [2].

Все виды модуляции, положенные в основу возбуждения колебаний, имеет определяющее значение при построении конкретных, специализированных КЭП. Так, одновременно с преимуществами следящих систем по управляемости, такие способы возбуждения режима мягкого периодического реверса как амплитудный и частотный сохраняют и их основной недостаток – необходимость применения специальных задающих устройств периодических сигналов. С точки зрения режима работы электромеханического преобразователя, более выгодна в энергетическом отношении балансно-частотная модуляция питающих токов. Но, с другой стороны, управление электрической машиной требует двух регулируемых по частоте мощных генераторов тока, работающих отдельно на каждую из фаз обмотки исполнительного двигателя и управляемых от отдельных задающих устройств. Подключение одной из фаз двигателя непосредственно к сети в данном случае невозможно. Все это, как известно, приводит к значительному увеличению мощности управления. В итоге сложность и трудность создания управляемых по частоте генераторов с малой девиацией частоты сдерживает распространение КЭП с частотно-токовым управлением.

Наиболее перспективным следует признать использование линейно-фазовой модуляции, кото-

рая может быть реализована, например, за счет разночастотного питании фаз исполнительного двигателя; при непрерывном изменении фазового сдвига между питающими напряжениями; путем питания одной из фаз постоянным, а других – переменным токами [2].

Фазовый способ возбуждения колебательного режима работы позволяет получить диапазоны плавного регулирования по амплитуде, частоте и положению нейтрали колебаний до четырех порядков, дает возможность создавать колебания без специальных задающих устройств периодических сигналов.

Одним из направлений повышения энергетических и динамических показателей колебательных электроприводов является построение их на основе машины двойного питания (МДП), когда одноименные статорные и роторные обмотки исполнительного двигателя соединены попарно параллельно [3]. При этом существенно возрастает КПД и мощность привода за счет компенсации инерционности нагрузки и формирования в колебательном двигателе синхронных свойств. В синхронном режиме мгновенные значения скорости изменения колебательного электромагнитного поля и подвижного элемента двигателя совпадают, скольжение отсутствует, что приводит к снижению потерь на нагрев, улучшению динамических показателей колебательной системы в целом.

Основные свойства колебательной машины двойного питания определяются рядом ее характеристик. В первую очередь к ним относятся амплитудно-фазочастотные кинематические (силовые), регулировочные и механические характеристики, которые могут быть получены для установившегося режима работы МДП на основании решения уравнения движения.

Однако выражения эти весьма громоздки и требуют при своем анализе большого объема вычислений, что делает затруднительным применение их для дальнейшего получения практических выводов. Поэтому, с целью наглядности и простоты исследования влияния параметров электрической машины, нагрузки и источников питания на рабочие характеристики МДП следует использовать ряд упрощающих допущений, в частности:

– рассматривать установившиеся режимы работы МДП, когда амплитуда колебаний подвижного элемента не превышает половины геометрического базового размера положения ротора (бегуна) обобщенного электродвигателя;
– если закон колебания подвижного элемента электродвигателя не имеет определяющего значения, то находить рабочие характеристики для первой гармоники колебаний;
– считать параметры нагрузки в процессе работы постоянными и независящими от времени;
– при необходимости определять отклонение выходных параметров относительными или среднеквадратичными величинами.

С учетом вышесказанного, первую гармоническую составляющую обобщенного колебательного электромагнитного усилия можно представить, как

$$M_{\text{эм},1}(t) = M_m \cdot \sin(\Omega t + \varphi),$$

где амплитуда M_m и фаза φ определяются выражениями

$$M_m = \left\{ \begin{matrix} f_{m0}^2 + f_{m1}^2 + f_{m2}^2 + \dfrac{2 f_{m1}}{[1+Z(\Omega)]^{0,5}} \times \\ \times [f_{m0} + f_{m2} \cdot Z(\Omega)] \end{matrix} \right\}^{0,5};$$

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{f_{m1}\sin\psi + f_{m2}\sin\alpha + f_{mo}\cos\alpha}{f_{m1}\cos\psi + f_{m2}\cos\alpha - f_{mo}\sin\alpha}. \qquad (1)$$

Здесь, амплитуды первых гармонических составляющих эквивалентных пускового f_{m1}, демпфирующего f_{m0} и позиционного f_{m2} усилий, а также комплексный коэффициент нагрузки $Z(\Omega)$ и фаза Ψ рассчитываются для колебательного режима работы на частоте Ω по выражениям:

$$\begin{aligned} f_{m1} = \big[& M_1^2 + M_3^2 \cdot J_0^2(\chi_m) + M_3^2 \cdot J_2^2(\chi_m) + \\ & + 2M_1 \cdot M_3 \cdot J_0(\chi_m)\cos(\psi_1 - \psi_3) - \\ & - 2M_1 M_3 J_2(\chi_m)\cos(\psi_1 + \psi_3 - 2\alpha) - \\ & - 2M_3^2 \cdot J_0(\chi_m) \cdot J_2(\chi_m)\cos 2(\psi_3 - \alpha) \big]^{0,5}; \end{aligned}$$

$$f_{m0} = \Omega \cdot \chi_m \{N_1 + N_5[J_0(\chi_m) + J_2(\chi_m)]\};$$

$$f_{m2} = 2M_5 \cdot J_1(\chi_m) \cdot \chi_m;$$

$$+ \operatorname{arctg} \frac{M_1 \sin\psi_1 + M_3 J_0(\chi_m)\sin\psi_3 - M_3 J_2(\chi_m)\sin(2\alpha - \psi_3)}{M_1 \cos\psi_1 + M_3 J_0(\chi_m)\cos\psi_3 - M_3 J_2(\chi_m)\cos(2\alpha - \psi_3)};$$

$$Z(\Omega) = (C_{\text{мех}}^{-1} + M_5 - L_{\text{мех}}\Omega^2)/(R_{\text{мех}} - N_1 - N_5)\Omega. \qquad (2)$$

В представленных формулах: $J_0(\chi_m)$, $J_1(\chi_m)$, $J_2(\chi_m)$ – функции Бесселя первого рода; χ_m, Ω, α – амплитуда, частота и начальная фаза установившегося закона колебаний; M_i – гармонические составляющие колебательного электромагнитного усилия; $L_{\text{мех}}$, $R_{\text{мех}}$, $C_{\text{мех}}^{-1}$ – коэффициенты инерционного, демпфирующего и позиционного усилий нагрузки.

Соотношения (1) и (2) являются базовыми и описывают совместно с законом движения координаты подвижного элемента МДП искомые амплитудно-фазочастотные кинематические $\chi_m(\Omega)$, $\alpha(\Omega)$, $\omega_m(\Omega)$ и силовые $M_m(\Omega)$, $\varphi(\Omega)$ характеристики, а также механические амплитудные (Ω = var) и мгновенные (t = var) характеристики по координате $\chi_m(M_m)$; $\chi(M_{\text{эм}})$ и скорости $\omega_m(M_m)$; $\omega(M_{\text{эм}})$ для различных видов нагрузки. Они определяют и всю гамму регулировочных характеристик $\chi_m(\alpha_i, \Omega, \Psi_i)$, $\alpha(\alpha_i, \Omega, \Psi_i)$, $\omega_m(\alpha_i, \Omega, \Psi_i)$, $\delta(\alpha_i, \Omega, \Psi_i)$, $M_m(\alpha_i, \Omega, \Psi_i)$,

$\varphi(\alpha_i, \Omega, \Psi_i)$ при подстановке в них зависимостей f_{m0}, f_{m1} и f_{m2} от функций регулирования.

В виду того, что представленные соотношения являются трансцендентными уравнениями (первая гармоническая составляющая колебательного электромагнитного усилия выражена через амплитуду и фазу выходных колебаний), то методика определения рабочих характеристик сводится, по существу, к построению для заданных параметров электрической машины, нагрузки и функций регулирования семейства зависимостей

$$\begin{cases} M_m = f_1(\chi_m, \alpha); \\ \varphi \ \ = f_2(\chi_m, \alpha). \end{cases}$$

Методом последовательных приближений, в качестве первого из которых целесообразно выбирать первое приближение закона движения, рассчитанное согласно методики [4], по графикам производят доопределение значений M_m и φ, которые являются исходными данными для расчета новых значений χ_m и α

$$\chi_m = \frac{M_m}{\Omega(R_{\text{мех}} - f_{m0}) \cdot \left[1 + Z^2(\Omega)\right]^{0,5}};$$

$$\alpha = \varphi - \text{arctg}\,\frac{1}{Z(\Omega)}.$$

Затем производят новое доопределение, и расчет повторяют до тех пор, пока не будет достигнута требуемая точность результатов расчета.

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты совместного решения уравнений (1), (2) с помощью ПЭВМ при нагрузке $L_{мех}$ = 18,7 о.е.; $R_{мех}$ = 2,0 о.е.; $C_{мех}^{-1}$ = 0 на частоте Ω = 0,1 о.е. для различных значений начальной фазы α закона движения подвижного элемента двигателя.

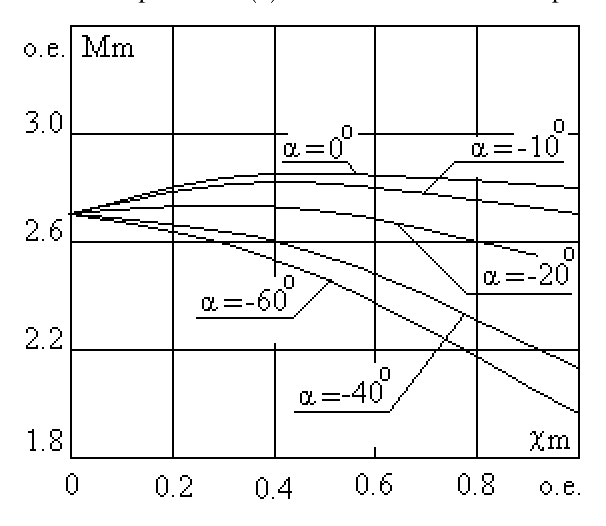
Установлено, что при принятых допущениях вместо выражений (2) можно использовать приближенные соотношения, определяющие составляющие колебательного электромагнитного усилия как

$$\overline{f}_{m0} = N_1 + N_5; \ \ \overline{f}_{m1} = \sqrt{M_1^2 + M_3^2};$$

$$\overline{f}_{m2} = M_5.$$

Их максимальные отклонения от f_{m0}, f_{m1} и f_{m2} при $\chi_m \leqslant 1$ не превышают 12 %, что позволяет значительно облегчить анализ рабочих характеристик и дает вполне приемлемые для большинства инженерных расчетов результаты. Для первого приближения рабочие характеристики МДП представлены табл. 1, 2.

В качестве примера на рис. 2 приведены амплитудно-фазочастотные характеристики (АФЧХ) МДП, разработанной на базе серийного электродвигателя 4АК160S8У3, входящей в состав системы воспроизведения асимметричных колебаний вибротранспортной технологической установкой горизонтального снаряжения трубчатых изделий АЭС. Анализ их показывает, что при малом механическом демпфировании ($R_{мех}$<1) на амплитудно-частотной характеристике (кривая 1) отчетливо наблюдается резонансный максимум, определяемый соотношением между электромагнитным позиционным усилием f_{m2}, развиваемым МДП и величиной инерционной нагрузки $L_{мех}$. Согласно принципа электромеханической аналогии, возрастающий участок АЧХ соответствует емкостному характеру нагрузки ($Z(\Omega)$>0), а падающий – индуктивному ($Z(\Omega)$<0). Наличие электромеханического резонанса приводит к изменению и обобщенного колебательного электромагнитного усилия. Оно также возрастает с увеличением частоты колебаний Ω, достигая своего максимального значения при $Z(\Omega)$=0, после чего уменьшается. Кривые 2 на рис. 2 иллюстрируют включение МДП в режим асинхронного двигателя. Последний и предопределяет в конечном итоге характер АФЧХ. Однако следует заметить, что в режиме асинхронного



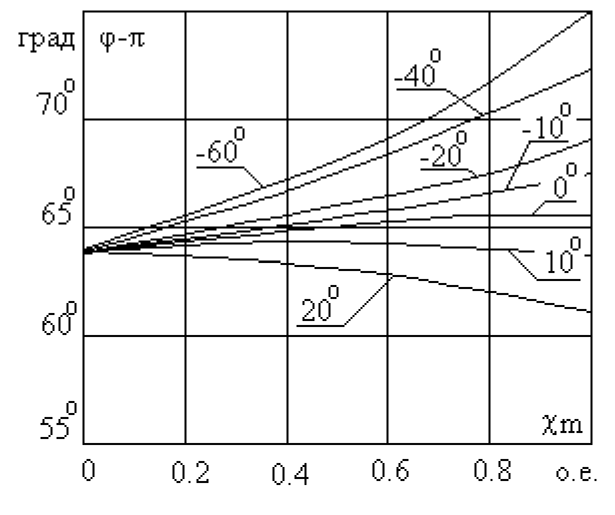


Рис. 1. *Зависимости амплитуды и фазы первой гармонической составляющей обобщенного колебательного электромагнитного усилия от амплитуды и фазы колебания подвижного элемента МДП*

Таблица 1. *Рабочие частотные и регулировочные характеристики МДП при периодическом движении ротора (бегуна) для первого приближения*

Наименование параметра		Виды нагрузок	
		$L_{мех} \neq 0; C_{мех}^{-1} \neq 0; R_{мех} \neq 0;$	$C_{мех}^{-1} = L_{мех}\Omega^2 - \bar{f}_{m2}$
Обобщенная координата положения $\chi(t)$	Амплитуда χ_m	$\frac{\bar{f}_{m1}}{\left[(C_{мех}^{-1}+\bar{f}_{m2}-L_{мех}\Omega^2)^2+(R_{мех}-\bar{f}_{m0})^2\Omega^2\right]^{0,5}}$	$\frac{\bar{f}_{m1}}{\left[(R_{мех}-\bar{f}_{m0})\Omega\right]}$
	Фаза α	$\mathrm{arctg}\frac{\sin\psi(C_{мех}^{-1}+\bar{f}_2-L_{мех}\Omega^2)-\cos\psi(R_{мех}-\bar{f}_{m0})\Omega}{\cos\psi(C_{мех}^{-1}+\bar{f}_2-L_{мех}\Omega^2)+\sin\psi(R_{мех}-\bar{f}_{m0})\Omega}$	$\psi-\frac{\pi}{2}$
Обобщенная скорость $\omega(t)$	Амплитуда ω_m	$\frac{\Omega\bar{f}_{m1}}{\left[(C_{мех}^{-1}+\bar{f}_{m2}-L_{мех}\Omega^2)^2+(R_{мех}-\bar{f}_{m0})^2\Omega^2\right]^{0,5}}$	$\frac{\bar{f}_{m1}}{\left[R_{мех}-\bar{f}_{m0}\right]}$
	Фаза δ	$\mathrm{arctg}\frac{\sin\psi(C_{мех}^{-1}+\bar{f}_2-L_{мех}\Omega^2)-\cos\psi(R_{мех}-\bar{f}_{m0})\Omega}{\cos\psi(C_{мех}^{-1}+\bar{f}_2-L_{мех}\Omega^2)+\sin\psi(R_{мех}-\bar{f}_{m0})\Omega}+\frac{\pi}{2}$	ψ
Обобщенное электромагнитное усилие $M_{эм}(t)$	Амплитуда M_m	$\bar{f}_{m1}\left[\frac{(C_{мех}^{-1}-L_{мех}\Omega^2)^2+R_{мех}\Omega^2}{(C_{мех}^{-1}+\bar{f}_{m2}-L_{мех}\Omega^2)^2+(R_{мех}-\bar{f}_{m0})^2\Omega^2}\right]^{0,5}$	$\bar{f}_{m1}\frac{(C_{мех}^{-1}-L_{мех}\Omega^2)^2+R_{мех}\Omega^2}{(R_{мех}-\bar{f}_{m0})\Omega}$
	Фаза φ	$\psi+\mathrm{arctg}\frac{\Omega[\bar{f}_{m0}(C_{мех}^{-1}-L_{мех}\Omega^2)+\bar{f}_{m2}R_{мех}]}{(C_{мех}^{-1}-L_{мех}\Omega^2)(C_{мех}^{-1}+\bar{f}_{m2}-L_{мех}\Omega^2)+R_{мех}(R_{мех}-\bar{f}_{m0})\Omega^2}$	$\mathrm{arctg}\frac{\bar{f}_{m0}(C_{мех}^{-1}-L_{мех}\Omega^2)\bar{f}_{m2}R_{мех}}{R_{мех}(R_{мех}-\bar{f}_{m0})\Omega}+\psi$

Таблица 2. Механические характеристики МДП по координате положения и скорости при периодическом движении ротора (бегуна)

Наименование		Виды нагрузок	
		$L_{мех} \neq 0;\ C_{мех}^{-1} \neq 0;\ R_{мех} \neq 0$	$C_{мех}^{-1} = L_{мех}\Omega^2$
Амплитудные	$\chi_m(M_m)$	$M_m\left[(C_{мех}^{-1} - L_{мех}\Omega^2)^2 + R_{мех}^2\Omega^2\right]^{-0,5}$	$\dfrac{M_m}{R_{мех}\Omega}$
	$\omega_m(M_m)$	$M_m\Omega\left[(C_{мех}^{-1} - L_{мех}\Omega^2)^2 + R_{мех}^2\Omega^2\right]^{-0,5}$	$\dfrac{M_m}{R_{мех}}$
Мгновенные (эллипс)	$\chi(M_{эм1})$	$\dfrac{\chi^2}{\chi_m^2}\left[1+Z_{мех}^2(\Omega)\right]+\dfrac{M_{эм1}^2}{M_m^2}\left[1+Z_{мех}^2(\Omega)\right]-2\dfrac{M_{эм}\chi}{M_m\chi_m}Z_{мех}(\Omega)\left[1+Z_{мех}^2(\Omega)\right]^{0,5}=1$	$\dfrac{\chi^2}{\chi_m^2}+\dfrac{M_{эм1}^2}{M_m^2}=1$
	$\omega(M_{эм1})$	$\dfrac{\omega^2}{\omega_m^2}\left[1+\dfrac{1}{Z_{мех}^2(\Omega)}\right]+\dfrac{M_{эм1}^2}{M_m^2}\left[1+\dfrac{1}{Z_{мех}^2(\Omega)}\right]-2\dfrac{M_{эм}\omega}{M_m\omega_m}\dfrac{1}{Z_{мех}^2(\Omega)}\left[1+Z_{мех}^2(\Omega)\right]^{0,5}=1$	–

Таблица 3. Условия обеспечения резонансного режима работы МДП при регулировании частоты колебаний Ω при Lмех ≠ 0; $C_{мех}^{-1} = 0$

	$\alpha_1=\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=\alpha$	$\alpha_1=\alpha$ $\alpha_2=\alpha_3=\alpha_4=1$	$\alpha_1=\alpha_3=\alpha$ $\alpha_2=\alpha_4=1$	$\alpha_3=\alpha_4=\alpha$ $\alpha_1=\alpha_2=1$
$\Omega=\left[\dfrac{C_{мех}^{-1}+\overline{f}_2}{L_{мех}}\right]^{0,5}$	$\dfrac{\Omega}{\alpha}=\mathrm{const}$ $\dfrac{\Omega}{\alpha}=\left[\dfrac{0.5(\rho_{18}-\rho_{17})}{L_{мех}}\right]^{0,5}$	$\Omega=\left[\dfrac{0.5(\alpha\rho_{18}-\rho_{17})}{L_{мех}}\right]^{0,5}$	$\Omega=\left[\dfrac{0.5(\alpha^2\rho_{18}-\rho_{17})}{L_{мех}}\right]^{0,5}$	$\dfrac{\Omega}{\sqrt{\alpha}}=\mathrm{const}$ $\dfrac{\Omega}{\sqrt{\alpha}}=\left[\dfrac{0.5(\rho_{18}-\rho_{17})}{L_{мех}}\right]^{0,5}$

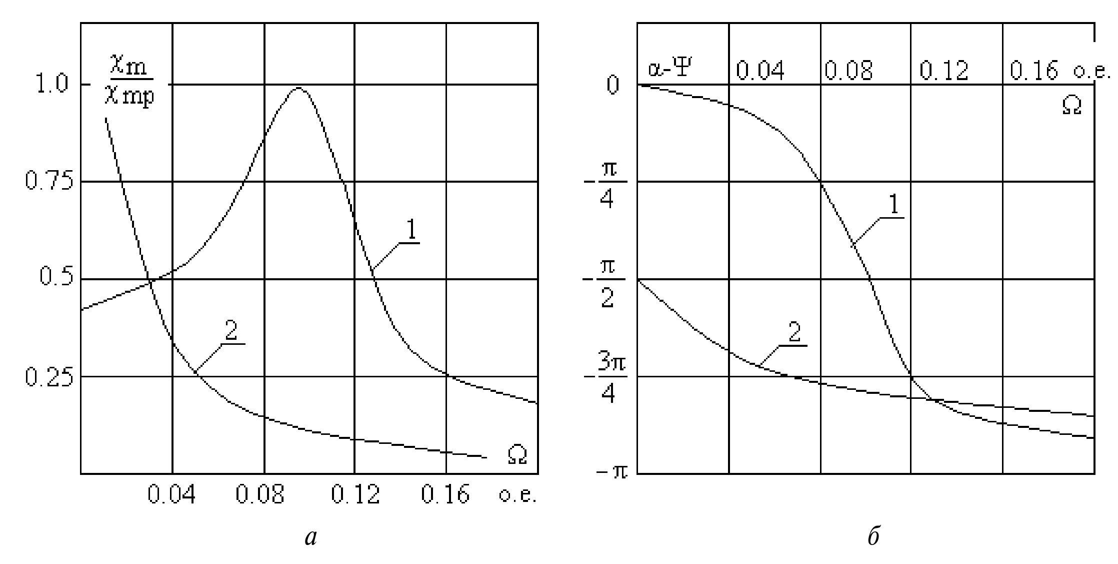


Рис. 2. *Амплитудно-фазочастотные кинематические характеристики МДП при $L_{мех}$=18,73 о.е.; $R_{мех}$=2,0 о.е.; $C_{мех}^{-1}$=0*

двигателя амплитудно-частотная силовая характеристика отличается от известной [1], так как учитывает механическое демпфирование нагрузки. В частности она имеет хотя и слабый, но падающий характер. Этот факт позволяет заключить о возможности синтезировать для некоторого частотного диапазона колебательный электропривод, инвариантный по усилию к частоте колебаний при f_{m0} = 0.

Амплитудные механические характеристики представляют собой не замкнутые кривые, а относительные и абсолютные мгновенные (рис. 3) – эллипсы. Независимо от режима работы МДП они занимают четыре квадранта и повернуты относительно начала координат соответственно на угол $\pi/4$ и угол

$$\alpha_{эл} = 0,5\operatorname{arctg}\frac{4M_m\cdot\omega_m}{M_m^2-\omega_m^2}\cdot\sqrt{1+Z_{мех}^2(\Omega)}.$$

В отличие от амплитудных механических характеристик и абсолютных мгновенных – относительные мгновенные механические характеристики представляют собой нагрузочные линии при колебательном режиме работы МДП и не связаны с ее параметрами.

Регулировочные характеристики наряду с механическими являются основными характеристиками исполнительных двигателей, работающих в режиме периодического реверса. Одним из главных требований, предъявляемым к ним, является линейность – прямая пропорциональная зависимость выходных параметров МДП от функций регулирования. Однако, как правило, это требование не выполняется. В первую очередь это связано с тем, что составляющие пускового f_{m1}, демпфирующего f_{m0} и позиционного f_{m2} усилий, определяющие в конечном итоге характер изменения выходных параметров МДП, являются нелинейными функциями от

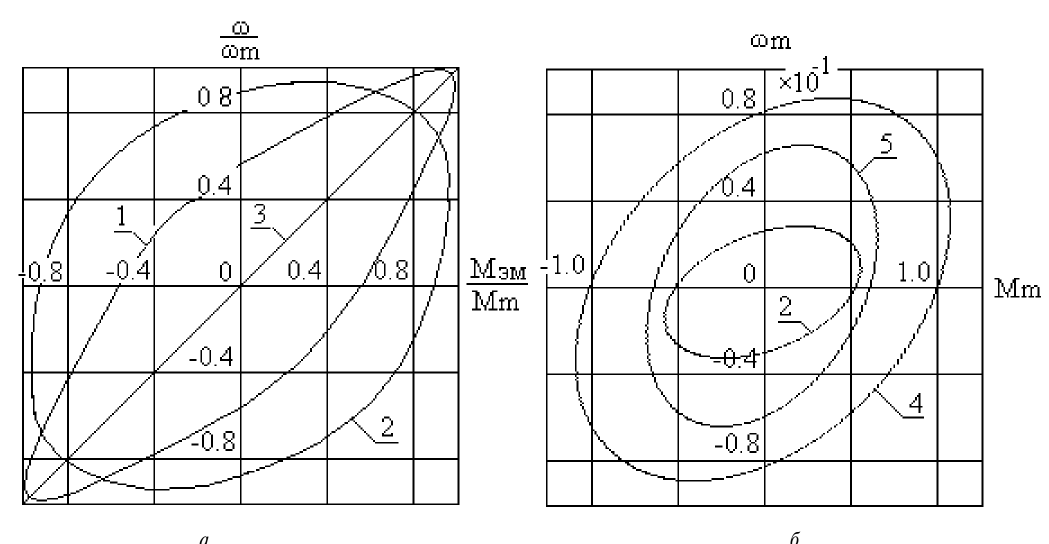


Рис. 3. *Мгновенные относительные а) и абсолютные б) механические характеристики МДП по скорости при $L_{мех}$=123 о.е.; $R_{мех}$=3,19 о.е.; $C_{мех}^{-1}$=0; Ω =0,02 (1), Ω =0,18 (2), Ω =0,1 (3), Ω =0,1 (4), Ω =0,08 (5) и $C_{мех}^{-1}$=1,23 о.е.*

коэффициента сигнала управления α_i. Причем нелинейность составляющих колебательного электромагнитного усилия зависит существенным образом от того, как и по каким из обмоток исполнительного двигателя производится регулирование. Во-вторых, выходные параметры колебательного электродвигателя, в свою очередь, сами являются нелинейными функциями f_{m0} и f_{m2}. Проведенный анализ способов регулирования показал возможность пропорционального регулирования некоторых из составляющих колебательного электромагнитного момента. В частности, при симметричном регулировании по одноименным обмоткам первичного и вторичного элементов обеспечивается пропорциональное регулирование амплитуды эквивалентного пускового усилия МДП, а при регулировании только по обмоткам ротора – составляющей электромагнитного позиционного усилия. Однако, несмотря на возможность реализации прямо-пропорционального регулирования составляющих колебательного момента линейность для $\chi_m(\alpha_i)$ не обеспечивается.

Возможность варьирования позиционным колебательным электромагнитным моментом позволяет регулировать собственную частоту колебаний КЭП, а, следовательно, поддерживать в заданном частотном диапазоне работы МДП энергетически выгодный резонансный режим работы. В связи с этим, в табл. 3 представлены алгоритмы обеспечения резонансного режима работы МДП ($Z(\Omega)=0$) при изменениях частоты колебаний Ω для различных способов регулирования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аристов А.В. Электропривод колебательного движения с машиной двойного питания. – Томск: ИПФ ТПУ, 2000. – 176 с.
2. Луковников В.И. Электропривод колебательного движения. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.
3. А. с. 1307530 СССР. Электропривод колебательного движения / А.В. Аристов и др. // Б.И. 1987. – № 16.
4. Аристов А.В., Аристов В.В. Исследование уравнения низкочастотного колебательного движения машины двойного питания // Электротехника. – 1994. – № 11. – С. 28–31.

УДК 621.313